中国生态农业学报 2017 年 6 月 第 25 卷 第 6 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jun. 2017, 25(6): 856−864

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160990

王浩, 王淑兰, 徐宗贵, 李军. 耕作与施肥对旱地玉米田土壤耗水量和水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 856−864
Wang H, Wang S L, Xu Z G, Li J. Effect of tillage and fertilization on water use efficiency of maize in dryland conditions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(6): 856−864

耕作与施肥对旱地玉米田土壤耗水量和水分利用效率的影响*

王 浩[1], 王淑兰[1], 徐宗贵[2], 李 军[1**]

(1. 西北农林科技大学农学院 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学林学院 杨凌 712100)

摘 要: 为探究保护性耕作与施肥对渭北旱地春玉米田土壤耗水量和水分利用效率的影响, 达到高效生产的目的。于 2013—2015 年在渭北旱塬实施了春玉米耕作与施肥田间试验, 共设置 6 种耕作与施肥处理: 翻耕+低肥(A1)、免耕+高肥(A2)、深松+平衡施肥(A3)、翻耕+无肥(B1)、免耕+无肥(B2)和深松+无肥(B3), 测定了春玉米休闲期与生育时期 0~200 cm 土层土壤蓄水量和收获时籽粒产量。结果表明: 1)保护性耕作能显著提高旱地玉米田土壤蓄水保墒能力。与传统翻耕处理 B1 相比, 休闲期, B2 和 B3 播前土壤蓄水量分别提高 23.39 mm 和 27.73 mm ($P<0.05$); 耕作处理区, B2 和 B3 全生育期土壤蓄水量平均提高 13.41 mm 和 15.70 mm; 耕作施肥处理区, A2、A3 土壤蓄水量较 A1 分别提高 13.15 mm、19.54 mm。2)平衡施肥能有效提高玉米全生育期平均土壤蓄水量, 与不施肥处理相比, 全生育期土壤蓄水量平均提高 6.79 mm ($P<0.05$)。3)保护性耕作与施肥能提高玉米籽粒产量与水分利用效率。耕作无肥处理区, 与 B1 比较, B3 处理产量提高 212~576 $kg\cdot hm^{-2}$, 水分利用效率提高 0.83~2.21 $kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$; 耕作施肥处理区, A3 产量与水分利用效率提高最为显著, 产量较 A1 提高 659~1 495 $kg\cdot hm^{-2}$, 水分利用效率提高 0.65~3.82 $kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$ ($P<0.05$)。3 种施肥方式下以氮、磷、钾平衡施肥产量与水分利用效率提高幅度最大。4)对耗水量与产量进行相关性分析发现, 抽雄—灌浆生育阶段土壤耗水量与产量呈显著正相关, 保护性耕作提高玉米生长初期土壤蓄水保墒能力, 提高春玉米抽雄—灌浆期土壤水分, 增加作物生长关键时期对水分的利用效率, 利于玉米籽粒产量的提高。因此在渭北旱地春玉米田, 深松与平衡施肥组合能提高春玉米产量与水分利用效率, 是该地区玉米高效生产较为适宜的种植模式。

关键词: 春玉米; 保护性耕作; 土壤耗水量; 水分利用效率; 产量
中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)06-0856-09

Effect of tillage and fertilization on water use efficiency of maize in dryland conditions*

WANG Hao[1], WANG Shulan[1], XU Zonggui[2], LI Jun[1**]

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: As crop production in rain-fed systems is highly dependent on natural rainfall, making full use of rainfall and in-

* 国家科技支撑计划项目(2015BAD22B02)、公益性行业(农业)科研专项(201303104, 201503116)和国家自然科学基金项目(31571620)资助
** 通讯作者: 李军, 主要从事旱作农业生态、高效农作制度和数字农作技术等方面的研究。E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn
王浩, 主要从事旱区水分高效利用技术研究。E-mail: nxywanghao@163.com
收稿日期: 2016-11-05 接受日期: 2017-03-01
* This study was supported by the National Key Technologies R & D Program of China (2015BAD22B02), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201303104, 201503116) and the National Natural Science Foundation of China (31571620).
** Corresponding author, E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn
Received Nov. 5, 2016; accepted Mar. 1, 2017

creasing water use efficiency are the main modes of dryland farming. Spring maize is one of the main grain crops in Weibei drylands where the plowing induces greater soil water evaporation. Conventional tillage is conducive for high water use efficiency in dryland farming. A study on fertilization and tillage in a field experiment was conducted in Weibei highlands in 2013–2015 to determine the effects of tillage and fertilization on soil water consumption and water use efficiency of spring maize in Weibei drylands. A total of six treatments were processed in the experiment — conventional tillage with low fertilization (A1), no-tillage with high fertilization (A2), subsoiling with balanced fertilization (A3), conventional tillage without fertilization (B1), no-tillage without fertilization (B2) and subsoiling without fertilization (B3). Soil water moisture in the 0–200 cm layer during fallow period and maize growth stages was measured and also grain yield under different treatments measured. The results showed that: 1) conservation tillage significantly improved soil water storage during fallow period. Compared with B1, B2 and B3 treatments increased oil water storage by 23.39 mm and 27.73 mm, respectively. 2). Conservation tillage increased soil water storage during the growth stage. Compared with B1, B2 and B3 enhanced water storage in the 0–200 cm by 13.41 mm and 15.70 mm, respectively. Compared with A1, A2 and A3 improved soil water storage by 13.15 mm and 19.54 mm, respectively. During the experiment, balanced fertilization effectively improved average soil water storage for the whole growth period by 6.79 mm. 3) Conservation tillage combination with fertilization increased grain yield and water use efficiency. Compared with B1 treatment, B3 improved grain yield by 212–576 kg·hm^{-2} and increased water use efficiency (WUE) by 0.83–2.21 kg·hm^{-2}·mm^{-1} ($P < 0.05$). Also compared with A1, A3 treatment increased grain yield by 659–1 495 kg·hm^{-2} and WUE by 0.65–3.82 kg·hm^{-2}·mm^{-1} ($P < 0.05$). Balanced fertilization had the highest grain yield and WUE. Compared with low and high fertilization, balanced fertilization increased grain yield by 1 268–2 682 kg·hm^{-2}, and improved WUE by 0.08–4.45 kg·hm^{-2}·mm^{-1} ($P < 0.05$). Correlation analysis showed a significant positive correlation between grain yield and soil water consumption during grain-filling stage. It was also noted that conservation tillage improved soil water storage in the early growth, increased soil water storage during tasseling–grain filling stage and promoted WUE at critical periods to increase grain yield. Thus, the combination of subsoiling with balanced fertilization was a suitable tillage system for enhancing grain yield and WUE in Weibei drylands.
Keywords: Spring maize; Conservation tillage; Soil water consumption; Water use efficiency; Yield

养分和水分是影响旱作农业生态系统生产力的主要因素，对作物生长具有协同效应[1-3]。许多研究表明，随着肥料投入量的增加，农田生产力提高；但是随着养分的高水平投入，农田生态系统生产力的限制因子由肥力限制转变为水分限制[4-6]。土壤水分状况是影响作物生长的关键因素，对作物生长发育状况和产量水平具有决定性影响[7-8]，因此培肥地力、蓄雨纳墒、减少土壤水分无效蒸发，提高土壤蓄水、保水和供水能力，从而提高作物水分利用效率和产量，成为旱作农业研究的重要任务。国内外研究表明，秸秆覆盖还田和免耕等保护性耕作措施能改善土壤结构，减少水土流失，提高土壤水分利用效率，增加土壤入渗，影响土壤水分时空分布，从而一定程度上缓解农田干旱危害[9-12]。

陕西渭北旱塬区降水时空分布不均且变率较大，田间蒸散量大，土壤水分不足。相关研究表明，渭北旱塬保护性耕作比传统翻耕可提高播前土壤蓄水量 20~40 mm，水分利用效率提高 2%~9%，增产 10%~40%[13-18]。化肥施用要配比合理，施量过少，达不到应有的增产效果，施肥过量，不仅浪费肥料，还污染土壤[19-20]；尤其在旱作农田，施肥量过高也会导致土壤水分的过度消耗[21-22]。适宜保护性耕作有助于蓄水保墒，而合理施肥能够实现以肥调水和促长增产，是促进玉米(*Zea mays*)增产增效的两大重要技术措施。已有的相关研究多以耕作或施肥单项措施效应为主，缺乏耕作与施肥组合模式的试验研究。同时已有研究主要分析了春玉米产量和关键生育时期土壤蓄水量，缺乏对各个生育阶段土壤耗水量的分析，对春玉米不同生育时期土壤耗水量与产量关系的研究仍然缺乏。本研究从渭北旱塬春玉米各生育时期土壤耗水量与产量关系出发，分析不同耕作施肥组合下春玉米不同生育阶段土壤耗水量和水分利用效率的差异，以期探索渭北旱塬春玉米不同生育时期土壤水分消耗规律，筛选出提高水分利用效率和产量的耕作与施肥组合模式。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于 2013—2015 年在陕西渭北旱塬东部合阳县甘井镇(35°19′54.45″N,110°05′58.35″E)进行，试验区属典型的半湿润易旱区，年平均降水量 536.6 mm，年平均气温 9~10 ℃，平均蒸发量 1 832.8 mm，≥10 ℃积温 2 800~4 000 ℃·d，全年无霜期 160~200 d。试验地地势平坦，土壤为黑垆土，土壤容重平均为 1.33 g·cm^{-3}，蓄水保肥能力强。试验地基础养分见表 1，试验期间春

玉米生长季降雨量见图 1。

表 1 试验地 0~60 cm 土层土壤主要养分指标

Table 1 Soil nutrient properties in 0–60 cm layer at the experiment field

年份 Year	有机质 Organic matter ($g\cdot kg^{-1}$)	碱解氮 Available N ($mg\cdot kg^{-1}$)	速效磷 Available P ($mg\cdot kg^{-1}$)	速效钾 Available K ($mg\cdot kg^{-1}$)
2013	10.96	43.18	14.28	109.38
2014	9.12	47.10	15.54	116.23
2015	10.71	45.20	12.89	110.75

1.2 试验处理

试验分别在 3 块农田设置耕作与施肥 6 个对比试验(表 2)，采用二因素裂区设计，耕作为主处理(设置翻耕、免耕和深松 3 个处理)，施肥为副处理(设置施肥和无肥 2 个处理)，共组合为 3 个耕作施肥区和 3 个耕作无肥区(表 2)。耕作与施肥(A1、A2、A3)处理区，小区面积 25 m×8 m，耕作无肥(B1、B2、B3)处理区面积 25 m×4 m, 4 次重复。氮磷钾肥料选用尿素、磷酸二铵和氯化钾，一次性撒施，然后进行旋耕，将肥料充分混合于 0~10 cm 土层土壤中。使用玉米播种机进行播种，株距 30 cm、行距 60 cm，密度 55 500 株·hm^{-2}，品种选用‘郑单 958’，种植制度为一年 1 季。播种时间为 4 月下旬, 9 月中旬收获。

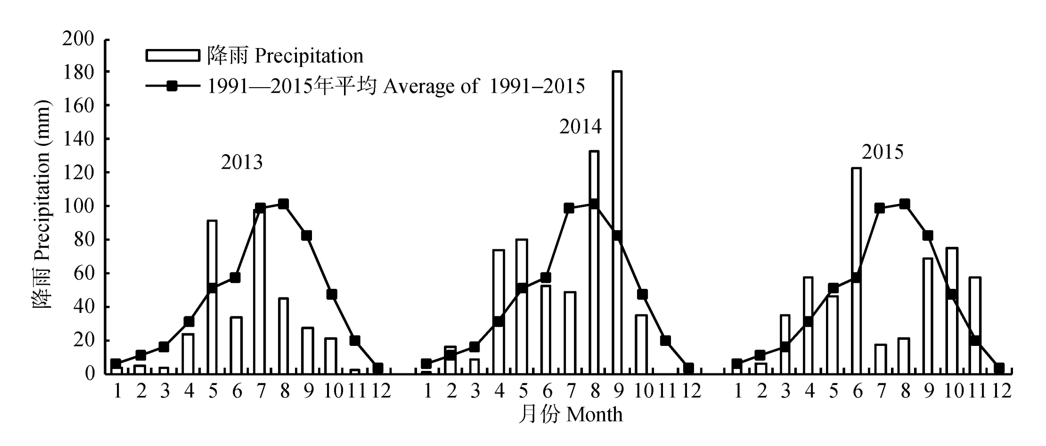


图 1 试验期间(2013 年 1 月至 2015 年 12 月)逐月降雨量分布

Fig. 1 Distribution of monthly precipitation at the experimental site from 2013 to 2015

表 2 土壤耕作与施肥处理概况

Table 2 Soil tillage and fertilization practices of different treatments

处理 Treatment	土壤耕作处理 Soil tillage treatment	施肥处理 Fertilization
A1	前茬玉米收获后秸秆粉碎还田，翻耕 20~25 cm，秸秆翻入耕层土壤；玉米播前肥料一次性撒施后旋耕，深度 20 cm。Smashed maize straws were returned to soil after harvest. Then soil was ploughed for 20–25 cm deep. Before sowing of spring maize, fertilizer was broadcasted and incorporated into 0–20 cm deep as the soil was tilled.	N=75 kg·hm^{-2} P_2O_5=60 kg·hm^{-2} K_2O=0 kg·hm^{-2}
A2	前茬玉米收获后秸秆粉碎还田覆盖地表，免耕；施肥与播种方式与 A1 一致。Smashed maize straw were mulched over soil surface with zero tillage practices after maize harvest. Fertilization and spring maize sowing method was consistent with A1.	N =255 kg·hm^{-2} P_2O_5=180 kg·hm^{-2} K_2O=0 kg·hm^{-2}
A3	前茬玉米收获后秸秆粉碎还田覆盖地表，土壤深松，每间隔 60 cm 深松 30~35 cm。施肥方式与 A1 一致。Smashed maize straw were mulched over soil surface. Then soil was tillage for 30–35 cm deep with 60 cm interval. Fertilization and spring maize sowing method was consistent with A1.	N=150 kg·hm^{-2} P_2O_5=120 kg·hm^{-2} K_2O=90 kg·hm^{-2}
B1	同 A1。The same as A1	不施肥 No fertilization
B2	同 A2。The same as A2	
B3	同 A3。The same as A3	

1.3 测定项目及方法

1.3.1 测定方法

1)水分测定：于每年 3—11 月每月 20 日左右采用土钻法测定 0~200 cm 土层土壤水分，每 20 cm 土层取样，先称湿土重，在 105 ℃恒温下烘干 8 h 后称干土重。对各处理进行 4 次平行测定，取平均值，计算土壤水分含量。

2)产量测定：玉米收获时测产，多点取样法于每个小区采集玉米样品 20 株，分为籽实和秸秆(除籽实外所有地上收获部分)测定籽粒产量和生物产量。

1.3.2 计算公式

土壤重量含水量=(湿土质量–烘干土质量)/烘干土质量×100% (1)

土壤贮水量(w, mm)=$\rho\times h\times\omega\times 10$ (2)

式中: ρ 为该土层的土壤容重($g\cdot cm^{-3}$), h 为土层厚度(cm), ω 为土壤重量含水量($g\cdot g^{-1}$)。

作物不同生育阶段耗水量(ET, mm)$=P+U-R-F-\Delta W$　(3)

式中: P 为降水量(mm), R 为径流量(mm), U 为地下水补给量(mm), F 为深层渗漏量(mm), ΔW 为生育时期末土壤贮水量与生育时期初土壤贮水量之差(mm)。试验地区为黑垆土, 疏松多孔, 再加上试验地平整, 地表径流小; 地下水埋深在 40 m 以下, 不易上移补给; 在有作物生长的农田, 多雨年份降水入渗深度不超过 2 m, 所以 F、U、R 可忽略不计。因此该公式可化简为:

$$ET=P-\Delta W \quad (4)$$

水分利用效率(WUE, $kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$)$=Y/ET$　(5)

式中: Y 为作物收获时籽粒产量。

1.4　数据处理与分析

数据输入和处理计算采用 Microsoft Excel 2013、Origin 作图, 数据统计分析使用 SPASS 19 软件, 进行方差分析(ANOVA)和相关性分析。

2　结果与分析

2.1　春玉米不同生育时期 0~200 cm 土层土壤蓄水量

不同生育时期春玉米田 0~200 cm 土层土壤蓄水量比较分析如图 2 所示。播种期土壤蓄水量反映了休闲期保护性耕作的蓄水保墒效果, 秸秆覆盖免耕与秸秆覆盖深松处理较翻耕处理均能显著提高春玉米播种期土壤蓄水量, 3 年平均 B2、B3 较 B1 土壤蓄水量分别提高 23.39 mm、27.73 mm, 保护性耕作提高春玉米田休闲期土壤蓄水保墒能力, 提升播前底墒。结合土壤蓄水量与产量相关性关系(表 3)对玉米生育期土壤水分进行分析, 全生育期 A2、A3 土壤蓄水量较 A1 分别提高 13.15 mm、19.54 mm, 其中拔节期土壤蓄水量均为 A1 处理最低, A2 和 A3 处理土壤蓄水量无显著性差异, A3 处理较 A1 处理土壤蓄水量 3 年分别提高 31.85 mm、9.38 mm 和 47.37 mm。抽雄期土壤蓄水量 A3>A2>A1, A3 处理土壤蓄水量显著高于 A2 和 A1 处理, A3 处理 3 年土壤蓄水量分别较 A1 处理提高 59.51 mm、9.04 mm 和 55.28 mm, 分别较 A2 处理提高 25.26 mm、9.01 mm 和 27.39 mm。可见 A3 处理有利于提高春玉米拔节期和抽雄期土壤蓄水量, 对春玉米增产具有一定作用。

在耕作处理区, 拔节期和抽雄期土壤蓄水量 B2、B3 无显著性差异, 3 年土壤蓄水量均显著高于 B1, 全生育期土壤蓄水量较 B1 平均提高 13.41 mm、15.7 mm, 说明保护性耕作能有效提高拔节和抽雄时期土壤蓄水量。耕作施肥处理区与无肥处理区土壤蓄水量差异反映了施肥措施的水分效应, 相同耕作处理下, 耕作施肥处理区与无肥处理区相比, 在春玉米生长前期, 耕作施肥处理区土壤蓄水量总体上高于耕作无肥处理区, 这与肥料的促长, 减少玉米棵间蒸发有关。但玉米灌浆期(2014 年和 2015)与成熟期(2013 年、2014 年和 2015 年)施肥区土壤蓄水量低于无肥处理区, 施肥增强了春玉米关键生育时期对土壤水分的利用, 促进作物籽粒建成。

2.2　春玉米各生育阶段土壤耗水量

土壤耗水量采用该生育阶段初期与末期土壤蓄水变化量, 根据水分观测间隔天数计算日平均耗水量(图 3), 研究不同处理在春玉米不同生育阶段对土壤水分的利用状况。可以看出在春玉米播种—出苗, 2013 年与 2014 年土壤水分消耗较少, 2015 年不同处理差异较大, 其中 A1、A2、B1、B2 土壤水分有所消耗, A3 与 B3 表现为土壤水分的补充, 这主要与年份间降雨差异有关(图 1), 也说明秸秆覆盖深松提高春玉米生长初期土壤蓄水保墒能力。拔节—灌浆期为土壤水分主要消耗时期, 无肥处理区土壤水分消耗的差异, 反映了不同耕作方式下的耗水效应, 在拔节—抽雄期与抽雄—灌浆期, 3 种耕作方式下土壤蓄水量 2013 年无明显差异, 2014 年与 2015 年 B1 耗水量最低, B2、B3 无明显差异, 说明秸秆覆盖保护性耕作会增加该生育阶段的土壤水分消耗, 相关性分析也表明(表 4), 此时段土壤耗水量与产量呈正相关关系, 因此 B2 和 B3 增加了春玉米关键生育时期土壤水分消耗, 对提高作物产量具有一定促进作用。耕作施肥处理区土壤水分的消耗状况反映了不同模式的水分消耗特性, 可以看出在拔节—灌浆期不同模式对土壤水分消耗影响较大, 其中在拔节—抽雄期 A2 水分消耗量显著增加, 抽雄—灌浆期 A3 水分消耗量增加明显, 结合各阶段耗水量与产量相关性关系, 可以发现 A3 模式耗水规律更有利于春玉米籽粒产量的提高。耕作施肥处理区与耕作处理区的差异反映了不同处理下施肥对土壤耗水量的影响, 可以看出在春玉米生长主要耗水期(拔节—灌浆期)施肥均显著增加了对土壤水分的消耗, 3 年平均 A1、A2、A3 较 B1、B2、B3 全生育期日耗水量分别增加 0.11 mm、0.14 mm 和 0.25 mm, 以 A3 施肥增加土壤耗水最为明显, 可加强春玉米关键时期作物对水分的利用。

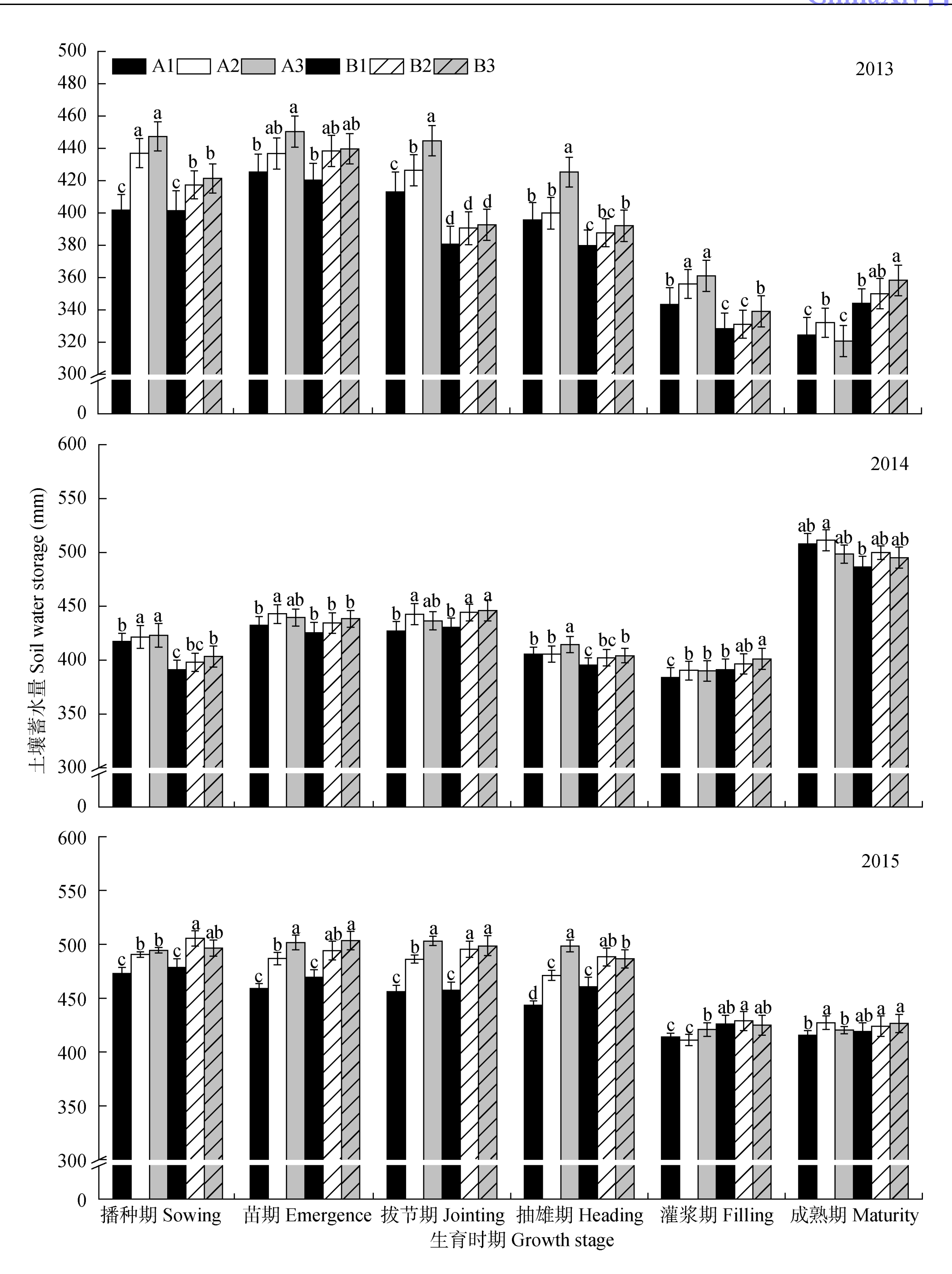


图 2 不同处理下春玉米不同生育时期 0~200 cm 土层土壤蓄水量

Fig. 2 Soil water storage in 0–200 cm layers of spring maize field at different growth stages under different treatments

不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著(P<0.05)。Different lowercase letters in the same stage indicate significant differences at 0.05 level among different treatments.

表 3 不同生育时期土壤蓄水量与春玉米籽粒产量的相关性

Table 3 Correlation between soil water storage capacity at different growth stages and yield of maize

	出苗 Emergence	拔节 Jointing	抽雄 Heading	灌浆 Filling	成熟 Maturity
Pearson 相关性 Pearson correlation	0.305	0.496	0.419	0.327	0.267
P	0.071	0.002	0.011	0.052	0.088

2.3 不同耕作与施肥下玉米产量与水分利用效率

不同耕作施肥组合下玉米产量和水分利用效率见表 5。耕作处理区，秸秆覆盖免耕与秸秆覆盖深松显著提高了春玉米籽粒产量，3 年平均 B2、B3 较 B1 籽粒产量分别提高 3.09%和 4.14%，水分利用效率分别提高 3.6%和 8.2%，在旱地玉米田采用保护性耕作

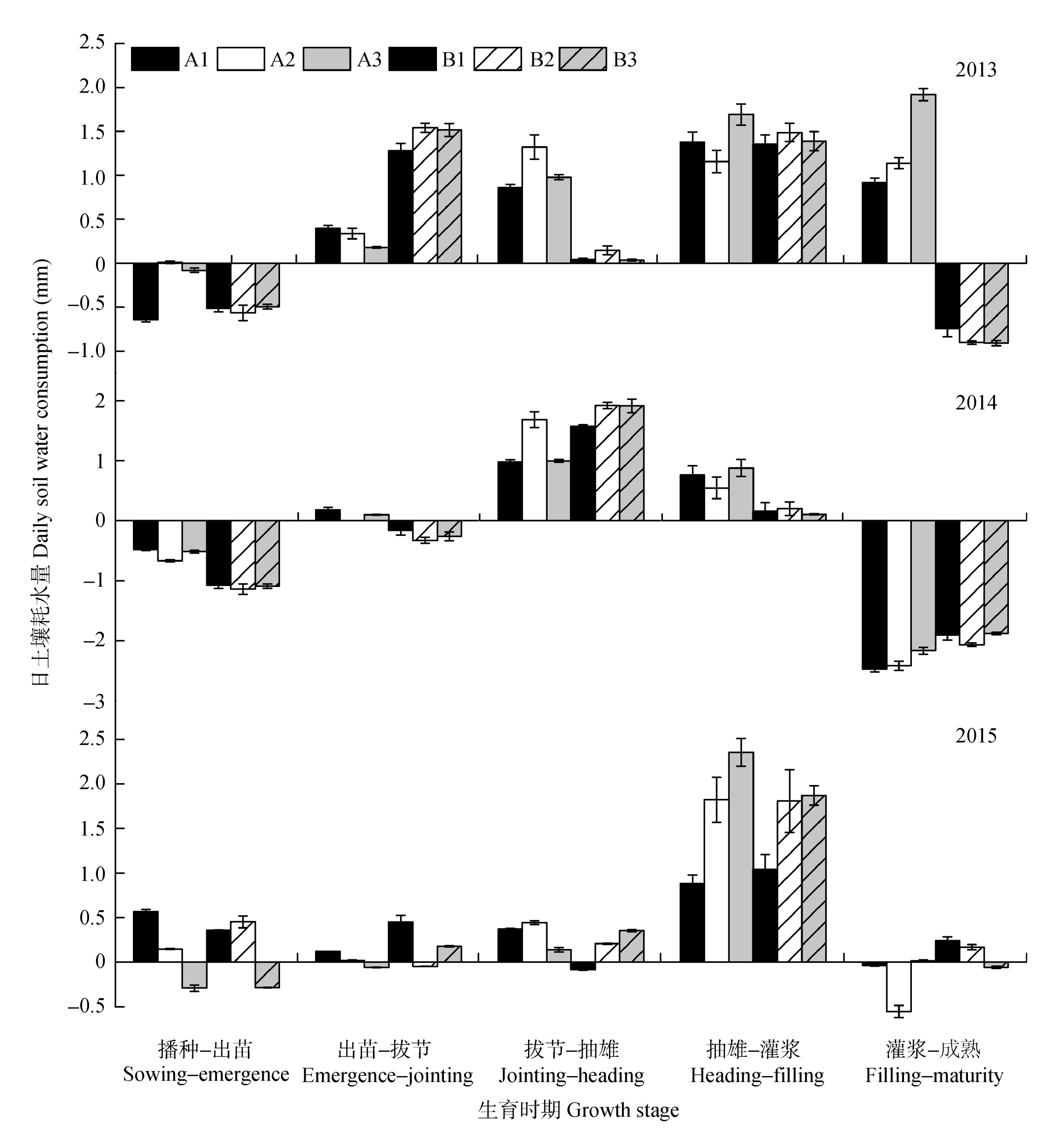


图 3　春玉米不同生育阶段不同处理的日土壤耗水量

Fig. 3　Daily soil water consumption at different growth stages of spring maize under different treatments

表 4　春玉米不同生育阶段土壤日耗水量与产量相关性

Table 4　Correlation between daily soil water consumption at different growth stages and yield of maize

	播种—出苗期 Sowing–emergence	出苗—拔节期 Emergence–jointing	拔节—抽雄期 Jointing–heading	抽雄—灌浆期 Heading–filling	灌浆—成熟期 Filling–maturity
Pearson 相关性 Pearson correlation	0.219	−0.061	0.308	0.701	−0.013
P	0.383	0.811	0.214	0.001	0.958

有利于产量提高和水分的高效利用。耕作施肥处理区水分利用效率与产量的差异反映了耕作施肥组合模式的水分与产量效应，可以看出 A2 与 A3 模式产量与水分利用效率均有提高，其中产量提高 559~1 326 kg·hm^{-2}、659~1 495 kg·hm^{-2}，水分利用效率提高 0.99~3.37 kg·hm^{-2}·mm^{-1}、0.65~3.82 kg·hm^{-2}·mm^{-1}，较 A1 均表现为水分的高效生产。耕作施肥处理区与无肥处理区产量与水分利用效率的差值反映了不同耕作下的施肥效应，施肥能明显提高春玉米产量与水分利用效率，3 年平均 A1、A2、A3 产量分别提高 1 065 kg·hm^{-2}、1 790 kg·hm^{-2} 和 1 909 kg·hm^{-2}，水分利用效率分别提高 2.0 kg·hm^{-2}·mm^{-1}、3.45 kg·hm^{-2}·mm^{-1} 和 3.33 kg·hm^{-2}·mm^{-1}，3 种施肥方式下以氮磷钾平衡施肥产量与水分利用效率提高最大，因此深松与平衡施肥组合能较大幅度地提高春玉米产量与水分利用效率，达到旱地玉米水分高效生产的目的。

表 5 不同处理下春玉米产量与水分利用效率(WUE)

Table 5 Yield and water use efficiency (WUE) of maize under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	播种土壤蓄水量 Soil water storage at sowing (mm)	成熟土壤蓄水量 Soil water storage at maturity (mm)	生育期耗水量 Water consumption (mm)	产量 Yield (kg·hm^{-2})	WUE (kg·hm^{-2}·mm^{-1})
2013	A1	421±9.8	324±10.9	390±10.1b	8 321±372c	21.31±0.52b
	A2	437±8.9	332±8.9	398±9.2b	8 880±285b	22.30±0.63ab
	A3	447±9.1	320±9.7	419±9.6a	9 702±563a	23.11±0.23a
	B1	391±12.3	323±8.9	360±8.8c	6 805±187e	18.88±0.47d
	B2	417±8.6	350±9.2	360±9.0c	7 001±321d	19.43±0.23c
	B3	421±8.9	358±9.5	356±9.1c	7 020±310d	19.71±0.28c
2014	A1	417±7.6	507±9.6	404±8.8a	8 921±317b	22.07±0.26b
	A2	421±10.5	507±9.7	408±8.6a	9 953±625a	24.37±0.39a
	A3	422±10.9	515±8.6	402±8.9a	10 416±416a	25.80±0.32a
	B1	391±8.6	486±9.8	399±9.2a	8 064±226d	20.19±0.45d
	B2	398±9.3	499±6.2	392±7.4b	8 548±320c	21.76±0.62c
	B3	403±9.6	495±8.7	402±8.6a	8 640±298c	21.44±0.38c
2015	A1	473±5.2	415±4.8	346±7.2b	9 140±366b	26.37±0.24b
	A2	490±2.6	427±6.4	351±5.3b	10 466±352a	29.74±0.47a
	A3	494±2.5	420±3.2	362±6.2a	9 799±561a	27.02±0.65a
	B1	453±8.2	415±7.8	331±8.0c	8 319±189d	24.73±0.59c
	B2	490±6.9	427±9.5	336±8.1c	8 379±152d	24.87±0.71c
	B3	494±7.6	451±8.6	316±7.8d	8 531±261c	26.94±0.52b
平均 Average	A1	437±7.5	415±5.6	380±6.4b	8 794±310b	23.25±0.36b
	A2	449±7.3	422±7.6	386±5.4a	9 766±321a	25.47±0.31a
	A3	454±6.4	418±7.3	394±6.8a	9 972±369a	25.34±0.42a
	B1	411±7.8	408±6.6	363±7.5c	7 729±285d	21.25±0.52d
	B2	435±7.5	425±6.8	363±7.1c	7 976±213c	22.02±0.55c
	B3	439±6.4	434±7.2	358±6.8c	8 063±207c	23.01±0.49bc

同列不同小写字母表示同一指标不同处理间差异显著($P<0.05$)。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level among different treatments.

3 讨论与结论

通过相关性分析可知，拔节期土壤蓄水量对春玉米产量影响最大，其次为抽雄期，这与人们传统的认识有所不同[23-25]，可能是因为该地区降雨不足，土壤贮水补充后期作物生长发育所消耗的大部分水分，因此在春玉米关键生育时期到来之前应保证充足的土壤水分。秦红灵等[26]也指出无论是何种耕作方式，除生育期降雨外，底墒是土壤供水的重要组成部分，旱地玉米田提高拔节与抽雄期土壤蓄水能有效提高春玉米籽粒产量。

保护性耕作较传统耕作能更好地蓄水保墒、提高水分利用效率和产量这是众多学者认同的，也是经过实践检验的[27-29]。本试验结果表明，秸秆覆盖免耕(B2)和秸秆覆盖深松(B3)较翻耕(B1)均能显著提高春玉米播前土壤蓄水量，土壤蓄水保墒能力显著增强，同时能有效抑制春玉米生长前期地表裸露造成的无效蒸发，提高春玉米关键生育时期土壤蓄水量，将有限的土壤水尽可能地用于生产玉米籽粒。进一步对耗水量与产量进行相关性分析发现，抽雄—灌浆生育阶段土壤耗水量与产量呈显著正相关，提高春玉米抽雄—灌浆期土壤水分，增加作物关键生育时期的土壤水分利用，有利于籽粒产量的提高。这应该与作物生长前期地表裸露，保护性耕作较传统耕作可以更好地减少地表蒸散有关[30-32]，提高作物生长关键生育时期的土壤蓄水量，增加作物可利用的土壤水分。这恰好遵循了春玉米生长耗水规律，前期保墒，后期供作物生长所需要的土壤水分。可见保护性耕作技术调控作物生长期间水分的消耗，使之满足玉米水分消耗规律，这也是玉米籽粒产量提高的主要原因之一。

提高施肥量可以显著提高玉米水分利用效率和产量[33-34]。本研究也发现施肥能有效增加作物生长前期土壤蓄水量，并显著提高水分利用效率和玉米

籽粒产量。氮、磷、钾平衡施肥对水分利用效率与产量提高最为明显。因此保护性耕作模式下玉米产量与水分利用效率的提高，一方面是由于保护性耕作的蓄水保墒效应，提高了春玉米关键生育时期土壤水分含量，另一方面施肥量的增加提高单位水资源生产的籽粒产量，同时深松与平衡施肥组合栽培模式是该地区玉米高效生产较为适合的种植模式，在旱地玉米田推行保护性耕作模式能充分利用旱区有限的水资源，对旱区玉米高效生产具有重要意义。

参考文献 References

[1] 田霄鸿，聂刚，李生秀．不同土壤层次供应水分和养分对玉米幼苗生长和吸收养分的影响[J]．土壤通报，2002, 33(4): 263–267
Tian X H, Nie G, Li S X. Effect of water and nutrients supplying in different soil layers on growth and nutrition absorption of corn seedlings[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(4): 263–267

[2] 王小彬，代快，赵全胜，等．农田水氮关系及其协同管理[J]．生态学报，2010, 30(24): 7001–7015
Wang X B, Dai K, Zhao Q S, et al. Opinions on water-nitrogen relations and their synergic management[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(24): 7001–7015

[3] 蔡守华，徐英，王俊生，等．土壤水分和养分时空变异性与作物产量的关系[J]．农业工程学报，2009, 25(12): 26–31
Cai S H, Xu Y, Wang J S, et al. Relationship between spatio-temporal variability of soil moisture and nutrients and crop yield[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 26–31

[4] 代快，蔡典雄，张晓明，等．不同耕作模式下旱作玉米氮磷肥产量效应及水分利用效率[J]．农业工程学报，2011, 27(2): 74–82
Dai K, Cai D X, Zhang X M, et al. Effects of nitrogen and phosphorus on dry farming spring corn yield and water use efficiency under different tillage practices[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 74–82

[5] 钟良平，邵明安，李玉山．农田生态系统生产力演变及驱动力[J]．中国农业科学，2004, 37(4): 510–515
Zhong L P, Shao M A, Li Y S. Changes of ecosystem productivity responding to driving forces in semiarid region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(4): 510–515

[6] 汪德水．旱地农田肥水协同效应与耦合模式[M]．北京：气象出版社，1999
Wang D S. In Dry Land Farming Fertilizer Synergies with the Coupled Model[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999

[7] 解文艳，樊贵盛，周怀平，等．秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J]．农业机械学报，2011, 42(11): 60–67
Xie W Y, Fan G S, Zhou H P, et al. Effect of straw-incorporation on corn yield and water use efficiency in arid farming areas[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 42(11): 60–67

[8] 付国占，李潮海，王俊忠，等．残茬覆盖与耕作方式对土壤性状及夏玉米水分利用效率的影响[J]．农业工程学报，2005, 21(1): 52–56
Fu G Z, Li C H, Wang J Z, et al. Effects of stubble mulch and tillage managements on soil physical properties and water use efficiency of summer maize[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 52–56

[9] 吴发启，赵西宁，崔卫芳．坡耕地耕作管理措施对降雨入渗的影响[J]．水土保持学报，2003, 17(3): 115–117
Wu F Q, Zhao X N, Cui W F. Effect of tillage management measure on rainfall infiltration[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3): 115–117

[10] 庄文化，冯浩，吴普特．高分子保水剂农业应用研究进展[J]．农业工程学报，2007, 23(6): 265–270
Zhuang W H, Feng H, Wu P T. Development of super absorbent polymer and its application in agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 265–270

[11] Iovieno P, Morra L, Leone A, et al. Effect of organic and mineral fertilizers on soil respiration and enzyme activities of two Mediterranean horticultural soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 2009, 45(5): 555–561

[12] Tejada M, Hernandez M T, Garcia C. Soil restoration using composted plant residues: Effects on soil properties[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 102(1): 109–117

[13] 毛红玲，李军，贾志宽，等．旱作麦田保护性耕作蓄水保墒和增产增收效应[J]．农业工程学报，2010, 26(8): 44–51
Mao H L, Li J, Jia Z K, et al. Soil water conservation effect, yield and income increments of conservation tillage measures on dryland wheat field[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 44–51

[14] 柏炜霞，李军，王玉玲，等．渭北旱塬小麦玉米轮作区不同耕作方式对土壤水分和作物产量的影响[J]．中国农业科学，2014, 47(5): 880–894
Bai W X, Li J, Wang Y L, et al. Effects of different tillage methods on soil water and crop yield of winter wheat-spring maize rotation region in Weibei Highland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(5): 880–894

[15] 王渭玲，徐福利，李学俊，等．渭北旱塬不同覆盖措施的土壤水分分布特征[J]．西北农业学报，2001, 10(3): 56–58
Wang W L, Xu F L, Li X J, et al. The soil moisture content and the change characteristics of different mulching methods in Weibei Rainfed highland[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2001, 10(3): 56–58

[16] 蔡太义，贾志宽，孟蕾，等．渭北旱塬不同秸秆覆盖量对土壤水分和春玉米产量的影响[J]．农业工程学报，2011, 27(3): 43–48
Cai T Y, Jia Z K, Meng L, et al. Effects of different rates of straw mulch on soil moisture and yield of spring maize in Weibei Highland area of China[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 43–48

[17] 李龙，郝明德，王缠军，等．渭北旱塬保护性耕作对春玉米产量及水分利用效率的影响[J]．西北农林科技大学学报：自然科学版，2014, 42(12): 46–52
Li L, Hao M D, Wang C J, et al. Effects of conservation tillage on water use efficiency and yield of spring maize on Weibei highland[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2014, 42(12): 46–52

[18] 李荣，王敏，贾志宽，等．渭北旱塬区不同沟垄覆盖模式对

春玉米土壤温度、水分及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 106–113
Li R, Wang M, Jia Z K, et al. Effects of different mulching patterns on soil temperature, moisture water and yield of spring maize in Weibei Highland[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 106–113

[19] 柴育红, 陈亚慧, 夏训峰, 等. 测土配方施肥项目生命周期环境效益评价——以聊城市玉米为例[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 229–236
Chai Y H, Chen Y H, Xia X F, et al. Life cycle analysis of environmental benefits through demonstration of the soil testing and formula fertilization project — A case study in maize production in Liaocheng City, Shandong Province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(1): 229–236

[20] 黄晶, 张杨珠, 刘淑军, 等. 水稻产量对长期不同施肥和环境的响应[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(11): 1367–1376
Huang J, Zhang Y Z, Liu S J, et al. Response of rice yield to different long-term fertilization regimes and the environment[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(11): 1367–1376

[21] 李世清, 李生秀. 水肥配合对玉米产量和肥料效果的影响[J]. 干旱地区农业研究, 1994, 12(1): 47–53
Li S Q, Li S X. The effects of applying fertilizers and water on maize production and fertilizer-use-efficiency[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1994, 12(1): 47–53

[22] 李芳林, 郝明德, 杨晓, 等. 黄土旱塬施肥对土壤水分和冬小麦产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(1): 154–157
Li F L, Hao M D, Yang X, et al. Effects of fertilization on soil water and winter wheat yield in dry land of Loess Plateau[J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(1): 154–157

[23] 谢军红, 张仁陟, 李玲玲, 等. 耕作方法对黄土高原旱作玉米产量和土壤水温特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(11): 1384–1393
Xie J H, Zhang R Z, Li L L, et al. Effect of different tillage practice on rain-fed maize yield and soil water/temperature characteristics in the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(11): 1384–1393

[24] 孙仕军, 樊玉苗, 许志浩, 等. 东北雨养区地膜覆盖条件下种植密度对玉米田间土壤水分和产量的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2650–2655
Sun S J, Fan Y M, Xu Z H, et al. Effects of planting density on soil moisture and corn yield under plastic film mulching in a rain-fed region of northeast China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(10): 2650–2655

[25] 邱立春, 孙跃龙, 王瑞丽, 等. 秸秆深还对土壤水分转移及产量的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(6): 84–91
Qiu L C, Sun Y L, Wang R L, et al. Influence of deep-buried maize stalks on soil moisture transfer and maize yield[J]. Journal of Maize Sciences, 2015, 23(6): 84–91

[26] 秦红灵, 李春阳, 高旺盛, 等. 干旱区保护性耕作对土壤水分的影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(4): 166–170
Qin H L, Li C Y, Gao W S, et al. Effect of plough and conservation tillage on soil moisture in ecotone between agriculture and animal raising of north China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(4): 166–170

[27] 王晖, 刘泉汝, 张圣勇, 等. 秸秆覆盖下超高产夏玉米农田产量和土壤水分的动态变化[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 261–264
Wang H, Liu Q R, Zhang S Y, et al. Grain yield and soil water content of super-high-yield summer maize under straw mulching[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 261–264

[28] 张淑勇, 国静, 刘炜, 等. 玉米苗期叶片主要生理生化指标对土壤水分的响应[J]. 玉米科学, 2011, 19(5): 68–72
Zhang S Y, Guo J, Liu W, et al. Responses of main physiological and biochemical indexes of maize leaf to soil moisture at seedling stage[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(5): 68–72

[29] 孔凡磊, 张海林, 翟云龙, 等. 耕作方式对华北冬小麦-夏玉米周年产量和水分利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(7): 749–756
Kong F L, Zhang H L, Zhai Y L, et al. Effects of tillage methods on crop yield and water use characteristics in winter-wheat/summer-maize rotation system in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(7): 749–756

[30] 张仁陟, 黄高宝, 蔡立群, 等. 几种保护性耕作措施在黄土高原旱作农田的实践[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 61–69
Zhang R Z, Huang G B, Cai L Q, et al. Dry farmland practice involving multi-conservation tillage measures in the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1): 61–69

[31] 王碧胜, 蔡典雄, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作对土壤有机碳和玉米产量及水分利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1455–1464
Wang B S, Cai D X, Wu X P, et al. Effects of long-term conservation tillage on soil organic carbon, maize yield and water utilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(6): 1455–1464

[32] 张俊鹏, 孙景生, 刘祖贵, 等. 不同水分条件和覆盖处理对夏玉米籽粒灌浆特性和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 501−506
Zhang J P, Sun J S, Liu Z G, et al. Effect of moisture and mulching on filling characteristics and yield of summer maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(3): 501−506

[33] 刘芬, 王小英, 赵业婷, 等. 渭北旱塬土壤养分时空变异与养分平衡研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 110–119
Liu F, Wang X Y, Zhao Y T, et al. Spatial and temporal variation of soil nutrient and nutrient balance status in Weibei rainfed highland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 110–119

[34] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259–273
Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259–273